

С. В. Кушнір, М. В. Кость

## Газовий осмос і його роль у формуванні газових родовищ Передкарпаття (Україна)

*(Представлено академіком НАН України Є. Ф. Шнюковим)*

*Встановлено, що помітна диференціація складу газів можлива лише при вертикальній міграції через достатньо ущільнені пласти глин. Для пояснення цього ефекту запропонована і теоретично обґрунтована концепція газового осмосу в нанопористих глинах. Відзначено, що в частково обезводнених глинистих пластах бароосмос і газовий осмос можуть співіснувати. На прикладі Залужанського газоконденсатного родовища показано, що при появі в розрізі осмотичних бар'єрів бароосмотичний профіль для пластових вод і крива зміни концентрації метану в газах розбиваються на кілька незалежних ділянок. Заповнення покладів родовища глибинними газами проходило поетапно, починаючи з колекторів верхніх горизонтів.*

Вільні природні гази мають високу схильність до латеральної і вертикальної міграції в осадових породах [1–5]. Міграція газів через глинисті пласти залежить від їх водонасиченості і часто супроводжується помітною диференціацією. Основним результатом диференціації звичайно є зменшення в газах вмісту метану і збільшення вмісту вуглеводнів  $C_2-C_5$  (ВВ) зі збільшенням глибини залягання газових покладів [3]. Для пояснення цього явища запропоновано кілька ідей (гравітаційне розділення, дифузія, хроматографічний ефект), але жодна з них не може визначити умов, що необхідні для реальної диференціації.

У новітній науковій літературі з нафтогазової геології вже відзначається можливість протікання в ущільнених породах не тільки дифузії, а й ефузії газів [5]. Однак причини ефузії в осадових породах та її геологічні наслідки досі залишаються невідомими.

Мета нашої роботи полягала у виявленні умов, необхідних для виникнення диференціації газів при їх вертикальній міграції та встановленні природи цього процесу на основі аналізу змін складу газів по покладах і бароосмотичних умов у пластових водах газових родовищ Передкарпаття.

Об'єкт дослідження — Залужанське газоконденсатне родовище (ГКР), де 13 газових покладів розташовані на глибинах понад 1 км при температурах від 36 до 111 °С. На рис. 1 зображено контури головних газових покладів та геологічний розріз родовища, що засвідчує його піднасувне положення і наводить на думку, що заповнення його покладів газом повинно було відбуватися з південно-східного боку через зону розущільнених піднасувних порід. Дані про газові поклади родовища та розраховані нами бароосмотичні характеристики пластових вод демонструє табл. 1. Загальна тенденція до збільшення вмісту метану в газах із зменшенням глибини їх залягання виражається тут у вигляді трьох незалежних хвиль збільшення в інтервалах від 3280 до 2700 м (НД-15 — НД-12Б), від 2800 до 2510 м (НД-12А — НД-10) та від 1840 до 1080 м (НД-6 — ВД-13), де початкові концентрації метану становлять відповідно 94,3, 93,1 та 92,3%. В інтервалі від 2350 до 1970 м (НД-9 — НД-7) вміст  $CH_4$  практично незмінний ( $(96,2 \pm 0,5)\%$ ). За даними ДП “Західукргеологія”, домішки

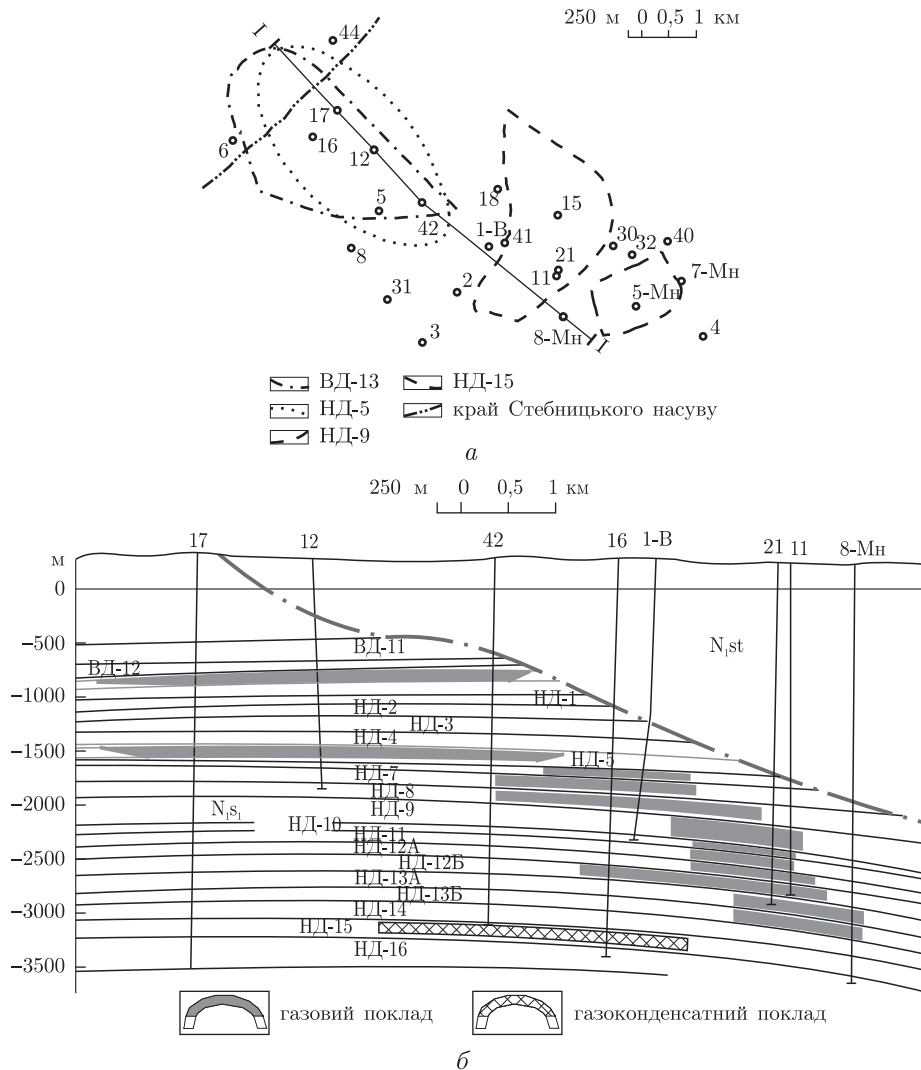


Рис. 1. Залужанське газоконденсатне родовище, за [6]:  
 а — контури головних газових покладів; б — геологічний розріз I — I

водню і гелію в газах родовища виявлені лише в окремих горизонтах розрізу: гелію в покладах горизонтів НД-6 (0,004%) та НД-7 (0,007%), а водню — в горизонтах НД-5 (0,01%) та НД-9 (0,47%). Це засвідчує, що породи навколо цих покладів мають надзвичайно низьку газопровідність. Газовий конденсат є лише в горизонті НД-15

Схожу з газами хвилеподібну динаміку змін має величина мінералізації пластових вод. Осмотичний же напір у водах ( $P_{o,n}$ ) з глибиною послідовно зростає, але ступінь їх відхилення від стану бароосмотичної рівноваги явно збільшується. На наш погляд, це можна вважати доказом того, що поклади верхньої частини розрізу сформувались раніше від нижніх, а умови для бароосмотичного концентрування їх вод виникали майже одночасно.

Геотермічний профіль родовища на рис. 2 зображено прямою лінією з градієнтом  $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  на 100 м, а пластові тиски ( $P_{пл}$ ) є близькими до умовно гідростатичних ( $P_{гдр}$ ) лише до глибини 2800 м. На більших глибинах різко виділяється зона високих надгідростатичних тисків, які нарастають з явним прискоренням. Вважаємо його наслідком збільшення концентра-

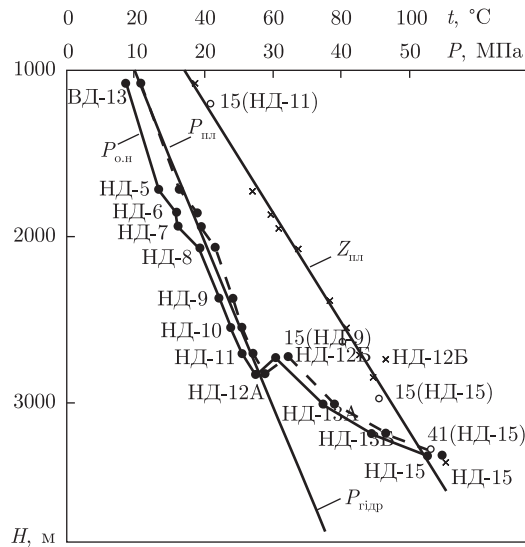


Рис. 2. Зміни пластового тиску, температури і бароосмотичного напору у пластових водах Залужанського ГКР.

На лінії  $t_{пл}$  нанесено точки замірів для газів (x) та води (o)

ції газу і об'єму води у відповідних покладах за рахунок нових надходжень. Очевидно, що формування Залужанського родовища ще не закінчилось, і до нього знизу продовжують повільно надходити глибинні або і сингенетичні гази термokatалітичного розкладу залишкової розсіяної органічної речовини навколишніх порід при достатньо ще високих температурах (>90 °C).

Подібно до кривої  $P_{пл}$ , крива  $P_{осн}$  також ділиться на дві незалежні частини. До горизонту НД-12А (89,5 °C; 29,3 МПа) це типовий бароосмотичний профіль, на якому видно

Таблиця 1. Характеристика покладів газу Залужанського ГКР, за [6]

Горизонт	Глибина, м	$Mn_{вод}$ , г/дм <sup>3</sup>	Пористість, %	Запаси газу, млн м <sup>3</sup>	Вміст CH <sub>4</sub> , %	$P_{пл}$ , МПа	$t$ , °C	$P_{осн}$ , МПа	$\alpha$ , %
ВД-13	1080	21,9	21,7	2531	98,38	10,7	36,5	9,0	84
НД-5	1700	38,1	18,0	4624	96,70	16,8	54	13,86	83
НД-6	1840	35,4	13,6	68	92,31	19,2	59,5	16,39	85
НД-7	1920	42,4	16,3	1416	95,87	20,0	61,5	16,5	83
НД-8	2050	23,3	14,7	1760	96,78	21,7	67,5	19,76	91
НД-9	2350	20,1	15,3	5008	96,08	24,3	77	22,62	93
НД-10	2510	17,1	13,5	365	97,58	25,9	81,5	24,44	94
НД-11	2670	18,06	13,4	345	96,70	27,5	86	25,94	94
НД-12А	2800	15,1	14,0	200	93,14	29,3	89,5	27,99	96
НД-12Б	2700	16,0	14,1	2026	98,47	32,5	93	31,1	96
НД-13А	2990	17,8	13,0	2250	95,73	39,5	97	37,95	96
НД-13Б	3150	21,4	13,3	2285	94,81	47,0	101,5	45,09	96
НД-15	3280	30,01	14,0	5062	94,33	55,1	111	52,55	95
Сумарно, млн м <sup>3</sup>				27940	26863				
Сумарно, %				100	96,10				

Примітка.  $Mn$  — Мінералізація;  $P_{пл}$  — пластовий тиск у воді;  $P_{осн}$  — осмотичний напір води;  $\alpha$  — ступінь відхилення від стану бароосмотичної рівноваги. Розрахунки  $P_{осн}$  й  $\alpha$  проведено за методикою [7] з урахуванням реальних пластових тисків й температур.

і ділянки концентрування пластових вод, і їх розведення. Це означає, що в пластових умовах бароосмос не припиняється при 60–70 °С [7], а може існувати і при 90 °С. Очевидно, що друга частина кривої  $P_{o.n}$  (від НД-12Б) до бароосмосу вже не відноситься.

Неочікувано різний характер змін складу горючих газів на Залужанському ГКР спонукав нас перевірити (за даними [4]) ці самі параметри покладів на інших родовищах північно-західної частини Зовнішньої зони Передкарпатського прогину (ЗЗПП). Виявилось, що за вмістом  $CH_4$  у газах усі багатопластові родовища можна розбити на дві групи:

1. Родовища з практично однаковим вмістом  $CH_4$  в усіх покладах: Свидницьке, Хідновицьке, Садковицьке, Рудківське, Більче-Волицьке, Угерське, Опарівське, Дашавське, Вишнянське (тобто усі неглибоко залягаючі (до  $\sim 1$  км)). На деяких з них проявляється слабе збільшення вмісту  $CH_4$  уверх по розрізу на всіх або частині покладів.

2. Родовища з різним складом газів в окремих покладах: Залужанське, Пинянське, Летнянське, Вижомлянське і Никловецьке (тобто глибоко залягаючі (понад 1 км)). На них простежується тенденція до зменшення кількості  $CH_4$  та збільшення вмісту ВВ униз по розрізу, аж до появи в нижніх горизонтах покладів з газовим конденсатом. Іноді у розрізах зустрічаються ділянки з практично незмінним складом газів.

Наведені факти підтверджують, що зменшення концентрації метану і збільшення вмісту ВВ у газах з глибиною реалізується тільки в певних геологічних умовах, однією з яких є достатня глибина залягання покладів, тобто і певне ущільнення глинистих порід [8]. Оскільки фільтрація через породи-колектори викликати диференціацію газів не може, а їх дифузія через водонасичені породи дуже повільна, то необхідно визнати, що розділення газів може відбуватись лише при їх міграції через достатньо ущільнені сухі (або частково обезводнені) глинисті товщі. Це означає, що глини можуть відігравати роль напівпроникних перегородок не тільки при міграції молекул  $H_2O$  із розчинів (бароосмос), а й при еміграції молекул  $CH_4$  із газових сумішей. Тому розділення вуглеводневих газів на глинистих перегородках можна назвати газовим осмосом. Уперше на можливість такого процесу ми вказували в публікації [9].

З точки зору молекулярної фізики [10] газовий осмос може бути наслідком переходу міграції газів у глинах від фільтраційного до ефузійного режиму [11]. При фільтрації через малоущільнені глини гази зберігають свій склад і невпорядкований хаотичний рух молекул, які постійно зіштовхуються між собою. При молекулярній ефузії (наприклад, у вакуумі) рух молекул стає прямолінійним і зіштовхуються вони практично лише зі стінками посудини. Такий режим руху газів можна створити в дуже тонких капілярах або в нанопористих сухих матеріалах [12]. Очевидно, що в таких умовах параметри руху газів будуть визначатись уже їх молекулярними характеристиками (табл. 2). При 25 °С різні молекули мають різні характеристики, але однакові значення середньої кінетичної енергії. Обчислена нами

Таблиця 2. Деякі молекулярні характеристики природних газів [13, с. 143]

Газ	$d$ , нм	$\bar{v}$ , км/с при 25 °С	$\bar{L}$ , нм при н. у.	$\bar{Z} \cdot 10^{-28}$ , н/с
$H_2$	0,274	1,772	118,0	20,40
He	0,218	1,257	176,5	9,13
$N_2$	0,375	0,475	59,6	10,22
$C_2H_6$	0,530	0,448	29,8	19,70
$O_2$	0,361	0,434	64,4	8,87

Примітка.  $d$  — Діаметр молекули;  $\bar{v}$  — середня швидкість руху;  $\bar{L}$  — середня довжина вільного проходження;  $\bar{Z}$  — середнє число зустрічей з іншими молекулами за секунду.

швидкість руху молекули метану дорівнює  $\sim 0,614$  км/с, тобто значно менша, ніж у водню і гелію, але більша, ніж у етану ( $C_2H_6$ ). Якщо прийняти швидкість  $CH_4$  за одиницю, то відносні швидкості виявляться такими:

$$\bar{v}(H_2) : \bar{v}(He) : \bar{v}(CH_4) : \bar{v}(C_2H_6) = 2,82 : 2,0 : 1,0 : 0,71.$$

Отже, в умовах ефузії з газової суміші рівних об'ємів  $H_2$ ,  $He$ ,  $CH_4$  й  $C_2H_6$  найшвидше будуть емігрувати  $H_2$  й  $He$ , найповільніше —  $C_2H_6$ . Тому відносно до  $CH_4$  водень і гелій будуть зменшувати, а етан — збільшувати свою концентрацію. Саме це і відбувається на газових родовищах, де, на нашу думку, реалізується газовий осмос. Очевидно, що в нанопористих глинах з їх складною системою наскрізних пор, реальна швидкість руху молекул буде значно меншою від наведених у табл. 2 значень  $\bar{v}$ , але набагато більшою, ніж при звичайній дифузії в мікропорах, де виникає опір зустрічних молекул.

Отже, для виникнення газового осмосу потрібні такі основні умови:  
наявність пластів сухих (або частково обезводнених) нанопористих глин;  
розташування цих пластів між газовими покладами;  
достатньо високі температури і тиски, які прискорюють ефузію.

Із цього випливає, що нанопористими глинисті пласти стають на глибинах близько 1 км, де загальна пористість їх  $< 20\%$ . У водонасичених глинах залишається тільки осмотично зв'язана вода, а це надає матеріалу високу бароосмотичну провідність [7]. Отже, є всі підстави припустити, що в глинистому пласті над кожним газовим покладом спрямований вверх бароосмотичний потік молекул  $H_2O$  буде поступово “осушувати” поровий простір глин і створювати тим самим умови для появи газового осмосу [14].

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що диференціація газів на газових родовищах при вертикальній міграції можлива лише при наявності умов для газового осмосу. Очевидно, що в частково обезводнених глинистих пластах бароосмос і газовий осмос можуть співіснувати. Таке співіснування, на наш погляд, відбувається на Хідновицькому газовому родовищі і викликає постійне зростання його розрахункових запасів газу. Зона такого співіснування різних типів осмосу — це гребені складок, де розміщені найтонші пласти глин, що легко обезводнюються. Для піскуватих і слабко ущільнених глин характерні вже наскрізні пори мікронних розмірів, по яких можлива і фільтрація газів [8]. В такому випадку результати газового осмосу можуть стати малопомітними, як це спостерігалось на газових родовищах неглибокого залягання. Внаслідок різних механізмів процесів роль бароосмосу з глибиною послаблюється [7], а газового осмосу — посилюється.

Зібрані дані для Залужанського ГКР дозволяють припускати, що його поклади заповнювались глибинними газами поетапно, починаючи з колекторів верхніх горизонтів. Така гіпотеза узгоджується з відомою циклічністю тектонічних процесів на території ЗЗПП в середньосарматський час [15], коли закінчувалось формування Карпатської гірської системи і консолідована осадова товща міоценових порід почала повільно і ритмічно підніматись. Це спричинило поступове розущільнення і гідрогеологічне розкриття глибших колекторських структур та заповнення їх глибинними газами. Гідрогеологічна відкритість пізніше була зафіксована епігенетичними процесами цементації у вигляді близьких до умовно гідростатичних пластових тисків аж до нашого часу, коли всі газоносні горизонти стали гідрогеологічно закритими. Ступінь закритості у різних ділянках розрізу був різним, що пов'язано з різною чистотою глин і різними темпами їх цементації. За даними табл. 1, основні бар'єри для бароосмосу сформувались у горизонтах НД-12А, НД-10, НД-6 й ВД-13, а для газового

осмосу — в горизонтах НД-12Б, НД-10 й ВД-13. Між подібними бар'єрами виникали пізніше окремі ділянки концентрування пластових вод та газоосмотичного збагачення метаном газів окремих покладів.

Таким чином відзначимо, що газовий осмос не може виникати на багатопластових родовищах з пропластковими колекторами, де хоч один із пропластків залишається водонасиченим. У цьому випадку при невеликих градієнтах пластових тисків можлива лише повільна дифузія газів через водний розчин, а при великих градієнтах — видавлювання води із мікропор та струйна міграція газу без зміни його хімічного складу.

1. Соколов В. А. Геохимия природных газов. – Москва: Недра, 1971. – 384 с.
2. Жузе Т. П. Миграция углеводородов в осадочных породах. – Москва: Недра, 1986. – 188 с.
3. Геология и геохимия природных горючих газов: Справочник / Под ред. И. В. Высоцкого. – Москва: Недра, 1990. – 315 с.
4. Павлюх О. Особливості геологічної будови та формування покладів газу в Зовнішній зоні Передкарпатського прогину // Геологія і геохімія горюч. копалин. – 2009. – № 3./4. – С. 31–43.
5. Перспективи нафтогазоносності глибокостанурених горизонтів осадових басейнів України: Матеріали конф. (Івано-Франківськ, 20–23 верес. 2005 р.) / За ред. Б. Й. Маєвського. – Івано-Франківськ: Факел, 2005. – 219 с.
6. Атлас родовищ нафти і газу України: В 6 т. / За ред. М. М. Іванюти. – Львів: Центр Європи, 1998. – Т. 4. Західний нафтогазоносний регіон. – 328 с.
7. Кушнір С. В. Бароосмотичний аналіз як новий метод гідрогеологічних досліджень // Доп. НАН України. – 2009. – № 11. – С. 104–110.
8. Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. Проницаемость и фильтрация в глинах. – Москва: Недра, 1986. – 160 с.
9. Кушнір С., Кость М., Дудюк І., Паньків Р. Бароосмотичний аналіз гідрогеологічних умов на Хідновицькому газовому родовищі // Геологія і геохімія горюч. копалин. – 2011. – № 1./2. – С. 86–88.
10. Кушнір Р. М. Загальна фізика. Механіка. Молекулярна фізика. – Львів: Видав. центр ЛНУ ім. І. Франка, 2003. – 404 с.
11. Ruthven Douglas M., De Sisto W. J., Higgins S. Diffusion in a mesoporous silica membrane. Validity of the Knudsen diffusion model // Chem. Eng. Sci. – 2009. – 64, No 13. – P. 3201–3203.
12. Li Z., Hong L. On the Knudsen transport of gases in nanochannels // J. Chem. Phys. – 2007. – 127. – 074706, 5 pp.
13. Бенсон С. Основы химической кинетики. – Москва: Мир, 1964. – 603 с.
14. Гамаюнов Н. И., Гамаюнов С. Н., Миронов В. А. Осмотический массоперенос. – Тверь: ПТУ, 2007. – 228 с.
15. Вялов В. С., Гавура С. П., Даныш В. В. и др. История геологического развития Украинских Карпат. – Киев: Наук. думка, 1981. – 180 с.

Інститут геології і геохімії горючих  
копалин НАН України, Львів

Надійшло до редакції 02.04.2013

**С. В. Кушнір, М. В. Кость**

### **Газовый осмос и его роль в формировании газовых месторождений Предкарпатья (Украина)**

*Установлено, что заметная дифференциация состава газов возможна лишь при вертикальной миграции через достаточно уплотненные пласты глин. Для объяснения этого эффекта предложена и теоретически обоснована концепция газового осмоса в нанопористых глинах. Отмечено, что в частично обезвоженных глинистых пластах бароосмос и газовый осмос могут сосуществовать. На примере Залузанского газоконденсатного месторождения по-*

казано, что при появлении в разрезе осмотических барьеров бароосмотический профиль для пластовых вод и кривая изменения концентрации метана в газах разбиваются на несколько независимых участков. Заполнения залежей месторождения глубинными газами проходило поэтапно, начиная с коллекторов верхних горизонтов.

S. V. Kushnir, M. V. Kost'

### **Gas osmosis and its role in the formation of gas fields of the Ciscarpathian region (Ukraine)**

*It is established that the noticeable differentiation of a gas composition is possible only with vertical migration throughout rather consolidated seams of clays. To explain this effect, we have proposed and theoretically grounded a concept of gas osmosis in nanoporous clays. It is noted that, in the partly water-free clay layers, baroosmosis and gas osmosis can coexist. By the example of the Zaluzhany gas-condensate field, it is shown that, with the appearance of osmotic barriers in the section, a baroosmotic profile for formation waters and a curve of change in the methane concentration in gases are divided into several independent plots. It is noted that the filling of the reservoir by deep-seated gas was held in stages, starting from the collectors of the upper horizons.*